ChinaXiv合作期刊

陕西省景观生态脆弱性时空演变及其影响因素①

张 行[1,2]， 陈 海[1,2]， 史琴琴[1,2]， 张 敏[1,2]， 刘 迪[1,2]
（1. 西北大学城市与环境学院,陕西 西安 710127；2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室,陕西 西安 710127）

摘 要：以陕西省为研究区,基于景观格局和景观功能2个方面构建景观生态脆弱性模型,分析省域及内部自然单元分区2个层面景观生态脆弱性时空演变,并运用地理探测器方法探究景观生态脆弱性多尺度驱动机制。结果表明:① 2000—2015年陕西省景观格局脆弱性指数分别是0.477 3和0.409 7,降低了6.76%,在空间上高值区分布于北部及中部,低值区分布于中部两侧;景观功能脆弱性指数分别是0.492 6和0.417 4,降低了7.52%,高值区集中于北部和中部,低值区呈零星分布的空间布局。② 研究期间陕西省景观生态脆弱性指数分别为0.427 5和0.369 7,减少了5.78%,呈现出南北方向高低交错的空间布局,且内部分区之间有明显分区过渡表现。其中,黄土高原区脆弱性降低8.55%;关中盆地区脆弱性降低3.81%;秦巴山地区脆弱性降低1.20%。③ 全省及内部分区生态脆弱性的影响因素因地理尺度的差异而不同,自然环境因素对脆弱性变化起重要作用,而社会经济因素呈不断增强态势。本文提出的景观生态脆弱性评价方法可为生态脆弱性评估提供方法参考。

关键词：景观生态；脆弱性；时空变化；影响因素；地理探测器；陕西省

随着人类活动和全球环境变化双重压力的加剧,生态脆弱性已成为诸多国际组织和机构关注的核心领域[1-3]。作为人类开发利用自然环境最直观的表现形式,土地利用/土地覆被等地表要素处于不断变化与动态平衡中,驱动着全球生态过程的变迁并形成地表景观的地域空间分异[4-5]。地球"人类世"新纪元的进入反映了地表景观格局与生态功能的双重变化,并关联生态环境的多向演变[6-8],尤其是针对景观生态脆弱性的评估及其多尺度影响因素的研究,能一定程度掌握区域脆弱性变化机制及相应区域特征,为区域生态脆弱性管控和生态系统恢复提供科学依据。

景观生态脆弱性指自然或人为因素干扰下,景观格局与生态过程相互作用表现出的脆弱程度[9-10]。其中,景观格局显示出不同生态系统或景观单元的空间关系和梯度变化特征,而景观功能体现各种生态过程中所生产的物质及其所维持的良好生活环境对人类的服务性能[11],景观功能丧失和退化将对人类福祉产生重要影响,直接导致区域乃至全球生态脆弱性提升[12]。目前,学者多从景观格局层面构建景观生态脆弱性框架,从景观功能方面或两者结合研究较少[6-7,13-15]。因此,从景观格局与景观功能的整体出发,研究区域景观生态脆弱性时空变化显得尤为重要。就影响因素来说,当前景观生态脆弱性影响因素研究多定性考量,定量研究相对较少,且多尺度影响因素分析更为缺乏[13,16]。而地理探测器是分析地理现象驱动因素的一种有效统计方法[17],可以用于不同尺度自然与社会经济问题研究。为更好揭示不同尺度下生态脆弱性影响因素及其差异,对多样性地理区域进行景观生态脆弱性时空演化及多尺度驱动因素研究就显得很必要。

长期以来陕西省不合理的土地利用致使植被破坏、水土流失和城乡发展无序化等问题突出,是我国土地生态脆弱区之一,也是人地关系较为复杂的地区。以地貌类型多样的陕西省为例,从景观格局与景观功能整体出发构建景观生态脆弱性演化模型,揭示其多尺度影响因素,从而通过生态功能恢复与格局优化促进区域生态系统由脆弱性向可持续状态转变。从宏观大尺度评估陕西省生态脆弱性时空演化特征与多尺度影响因素,为景观生态脆弱性评估中信息的丰富提供理论支撑,为区域景观结构优化提供依据,最终为因地制宜地进行生态环境建设和

① **收稿日期：**2019-05-21； **修订日期：**2019-08-28
基金项目：国家自然科学基金项目(41671086,41871185)资助
作者简介：张行(1989-),男,博士研究生,研究方向为乡村发展与土地利用. E-mail：zhrwdl2000@126.com
通讯作者：陈海. E-mail：chw@nwu.edu.cn

chinaXiv:202004.00062v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202004.00062v1

恢复工程提供科学参考。

1　研究区及数据来源

1.1　研究区概况

陕西省是连接东南西北的重要枢纽,南北气候差异较大,总面积为 2.06×10^5 km^2,其中林地 1.24×10^5 km^2(图 1)。秦巴山区是国家生态功能限制开发区和南水北调重要水源地,具有重要生态定位,包括南部汉中、安康和商洛 3 个地级市;关中盆地具有区域战略定位,是陕西省乃至西北地区文化、经济和政治中心,包括中部的西安市、咸阳市、宝鸡市、渭南市和铜川市;陕北黄土高原地貌类型(风沙地貌、墚、塬、峁及其复合丘陵沟壑地貌等)多样,是黄土高原代表性区域,包括北部榆林和延安 2 市[18-19]。近年来,陕西省随着退耕还林政策落实和区域城镇化发展,土地覆被的剧烈变化引致景观格局和景观功能的改变,这为探讨区域景观生态脆弱性时空分异及其影响因素提供了良好的研究平台。

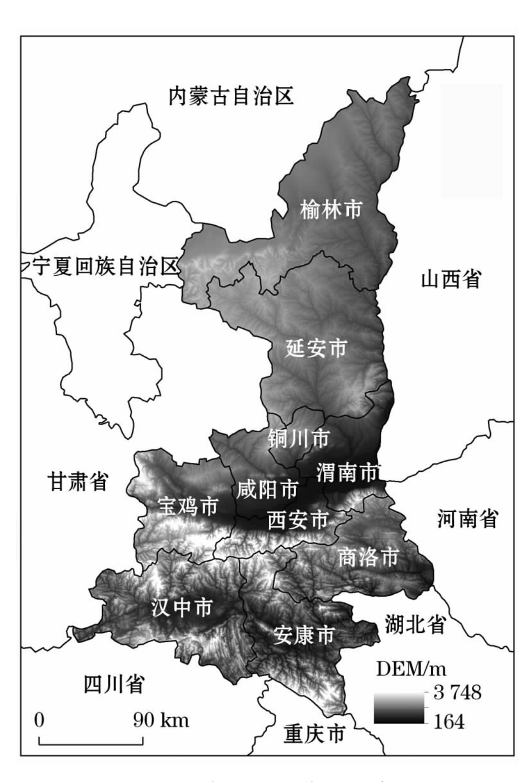


图 1　研究区地理位置示意图

Fig. 1　Geographical location of study area

1.2　数据来源

2000 年、2015 年土地利用数据源于国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心”的陕西省 1∶100 000 土地利用矢量数据集。参照全国土地利用分类标准(GB/T21010—2017),分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 类,解译精度达到 90% 以上,并统一重采样为 30 m 栅格用于后续格网分割。基于省域尺度景观生态系统研究以 10 km 左右为评价单元已基本达成共识[20],为提高估算精度,在结合陕西省各景观类型面积基础上,依据等间距系统采样将研究区划分为 12 km×12 km 网格。生态脆弱性演化影响因子研究涉及地形、气候、植被、生产总值、社会固定资产投资、城镇化率、人口密度、垦殖率多个数据集。其中,DEM 数据源于中国科学院计算机网络信息中心(地理空间数据云)GDEM 数据集,并由此生成坡度数据;年均降水、年均气温数据源于中国科学院地球系统科学数据共享平台;NDVI 数据是基于 2 期影像数据,利用 ENVI 软件对影像处理后获取。生产总值、社会固定资产投资、城镇化率、人口密度、垦殖率数据来自陕西省各县区统计年鉴。

2　研究方法

2.1　景观生态脆弱性模型构建

生态系统在外界干扰下向复杂、异质、不连续方向变化,景观格局破坏与退化对区域生态系统产生较大影响[21]。破碎度、分离度和优势度可以反映景观受干扰后的格局特征,同时不同景观类型抵抗外界干扰能力及对外界敏感程度存在差异,即景观具有格局脆弱性[7]。外界扰动不仅使景观格局发生变化,而且引起区域景观功能发生变化。景观具有水文调节、气候调节、土壤形成、养分循环等功能,可采用生态系统服务价值进行量化[22]。因此,以景观敏感性和景观适应性构建景观格局脆弱性指数,引入生态服务价值构建景观功能脆弱性指数,综合格局与功能两方面对景观生态脆弱性进行探究。

2.1.1　景观格局脆弱性　景观格局脆弱性(*LSV*)通过景观敏感性(*LSI*)和景观适应性(*LAI*)来构建。景观适应性(*LAI*)与斑块丰度密度指数(*PRD*)、多样性指数(*SHDI*)和均匀度指数(*SHEI*)有关。而景观敏感性(*LSI*)由干扰度指数(U_i)和易损度指数(V_i)构建。易损度表示不同景观类型对干扰的抵抗度,依据专家打分法对景观类型赋以不同权重,求和标准化处理后易损度由高到低分别为未利用地 0.294、水域 0.246、耕地 0.211、林地 0.136、草地 0.127、建设用地 0.035。干扰度指数由破碎度(C_i)、

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202004.00062v1

分离度(N_i)、优势度(D_i)构建,赋权重分别用 a、b、c 表示,值分别为 0.5、0.3、0.2[23]。

$$U_i = aC_i + bN_i + cD_i \quad (1)$$

$$LSI = \sum_{i=1}^{n} U_i \times V_i \quad (2)$$

$$LAI = PRD \times SHDI \times SHEI \quad (3)$$

$$LSV = LSI \times (1 - LAI) \quad (4)$$

2.1.2 景观功能脆弱性 将景观看成一个复杂生态系统,景观功能是指与周围环境、能量和信息复杂相互关联,在这种关联影响下景观内部发生的各种变化。在物质流、能量流和物种流的相互作用下,各景观类型表现出水分调节、养分循环、食物生产等一系列性能[24]。因此,将每种景观类型看成一个生态系统,从而将生态系统服务价值与景观功能结合起来,采用生态系统服务价值对景观功能脆弱性指数进行量化。由于本文研究的是各景观类型相对生态脆弱性,参照生态服务价值当量表示各景观类型景观功能差异性,因此,用单位面积生态服务价值来表征景观功能。本文借鉴谢高地等[25]最新确定的2010年全国生态系统服务价值当量,参考同期陕西与全国单位面积粮食产量之比,确定陕西的修正系数,得到陕西单位面积生态系统服务价值当量(表1)。

表1 陕西省单位面积生态系统服务价值当量

Tab.1 Ecosystem service equivalent value per unit area in Shaanxi Province

一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	水域	未利用地
供给服务	食物生产	1.36	0.29	0.38	0.80	0.01
	原料生产	0.09	0.66	0.56	0.23	0.03
	水资源供给	-2.63	0.34	0.31	8.29	0.02
调节服务	气体调节	1.11	2.17	1.97	0.77	0.11
	气候调节	0.57	6.5	5.21	2.29	0.10
	净化环境	0.17	1.93	1.72	5.55	0.31
	水文调节	2.72	4.74	3.82	102.24	0.21
支持服务	土壤保持	0.01	2.65	2.4	0.93	0.13
	维持养分循环	0.19	0.2	0.18	0.07	0.01
	生物多样性	0.21	2.41	2.18	2.55	0.12
文化服务	美学景观	0.09	1.06	0.96	1.89	0.05

$$LFV = 1 - \sum_{i}^{m} \frac{A_i}{A} \times ESV_i \quad (5)$$

式中:A_i 表示第 i 类景观类型在网格内所占面积;m 表示景观的类型数;A 表示网格面积;ESV_i 表示第 i 类景观类型生态系统服务;LFV 表示景观功能脆弱性指数。

2.1.3 区域景观生态脆弱性模型 景观是一个整体系统,其格局和功能在外界干扰和本身自然演替作用下呈动态变化特征。景观功能需基于自身格局,而功能亦是格局体现,因此难以判定两者对脆弱性影响程度。将景观格局脆弱性指数与景观功能脆弱性指数的几何平均值作为景观生态脆弱性值[22],得到景观生态脆弱性 LEV 计算公式:

$$LEV = \sqrt{LSV \times LFV} \quad (6)$$

式中:LEV 表示景观生态脆弱性;LSV 景观格局脆弱性;LFV 景观功能脆弱性。

2.2 空间分析法

生态脆弱性指数作为一种区域变量,为探讨脆弱性指数空间分异,可以用地统计学中半方差函数来衡量其在空间上的变化规律[7],公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \left[Z(x_i + h) - Z(x_i) \right]^2 \quad (7)$$

式中:$\gamma(h)$ 是样本距为 h 的半方差值,h 是样本距(变程);$Z(x_i+h)$ 是位置 x_i+h 处的脆弱性值;$Z(x_i)$ 是位置 x_i 处的脆弱性值;$N(h)$ 是间距为 h 的样本对总个数。本文采用地统计软件 $GS^+7.0$ 来实现样本变异函数最优拟合。结合不同模型拟合优度,2000 年和 2015 年脆弱性空间分析基于指数模型进行拟合。

2.3 地理探测器

地理探测器是探测空间分异并揭示其背后驱动因子的统计学方法[14]。本文运用因子探测和交互探测模型对省域及单元分区景观生态脆弱性影响因素进行识别,计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} \quad (8)$$

式中:L 为脆弱性 Y 或影响因子 X 的分层;N_h 和 σ_h^2 分别为层 h 的单元数和方差;N 和 σ^2 分别为研究区整体单元数和方差。q 为因子对脆弱性的影响程度,值域为[0,1],值越大,解释率大。交互探测可以评估因子 $X1$ 和 $X2$ 共同起作用时是否会增减对脆弱性 Y 的解释力。首先应计算两因子 $X1$ 和 $X2$ 对 Y 的 q 值:$q(X1)$ 和 $q(X2)$,并且计算其交互时的 q 值:$q(X1 \cap X2)$,并对 $q(X1)$、$q(X2)$ 与 $q(X1 \cap X2)$ 进行比较。两因子间的关系可分为非线性减弱、单

ChinaXiv合作期刊

因子非线性减弱、双因子增强、独立和非线性增强5类。

3　结果与分析

3.1　景观生态脆弱性时空分异

本文基于自然断点法将景观格局脆弱性、景观功能脆弱性以及景观生态脆弱性进行分级,等级越高表示脆弱性越大。结果如图2、图3和图4所示。

3.1.1　景观格局脆弱性　研究区景观格局脆弱性高值区分布于北部及中部,低值区分布于中部两侧(图2)。景观格局脆弱性有降低趋势。2000年Ⅰ、Ⅱ级脆弱区约占总面积50%,主要位于秦岭北麓与关

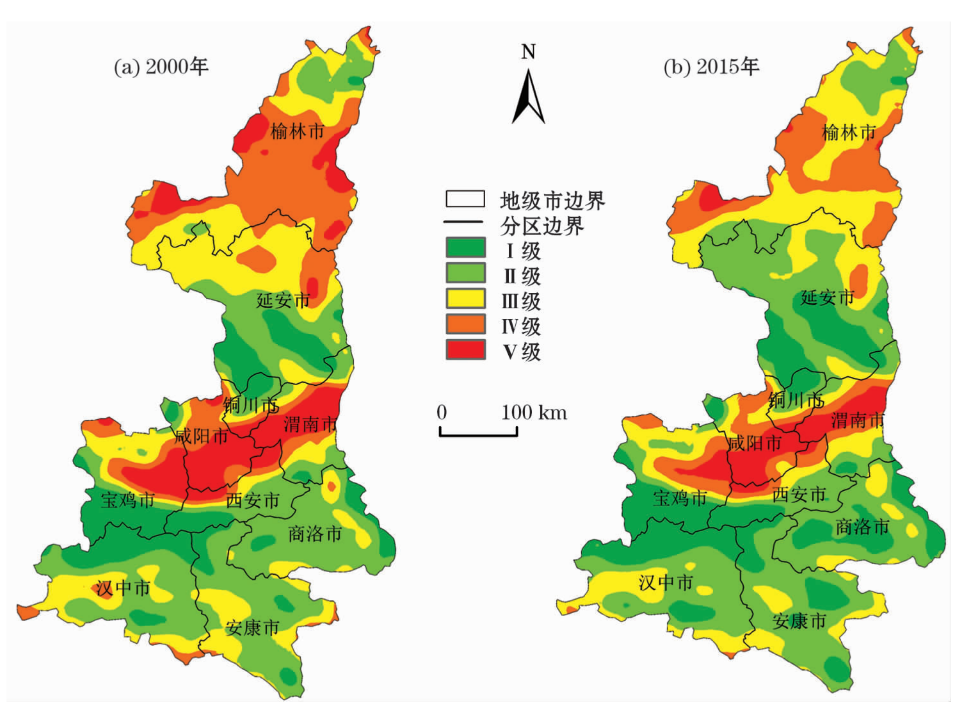


图2　2000—2015年陕西省景观格局脆弱性时空演化

Fig. 2　The spatio-temporal evolution of landscape pattern vulnerability in Shaanxi Province during 2000 – 2015

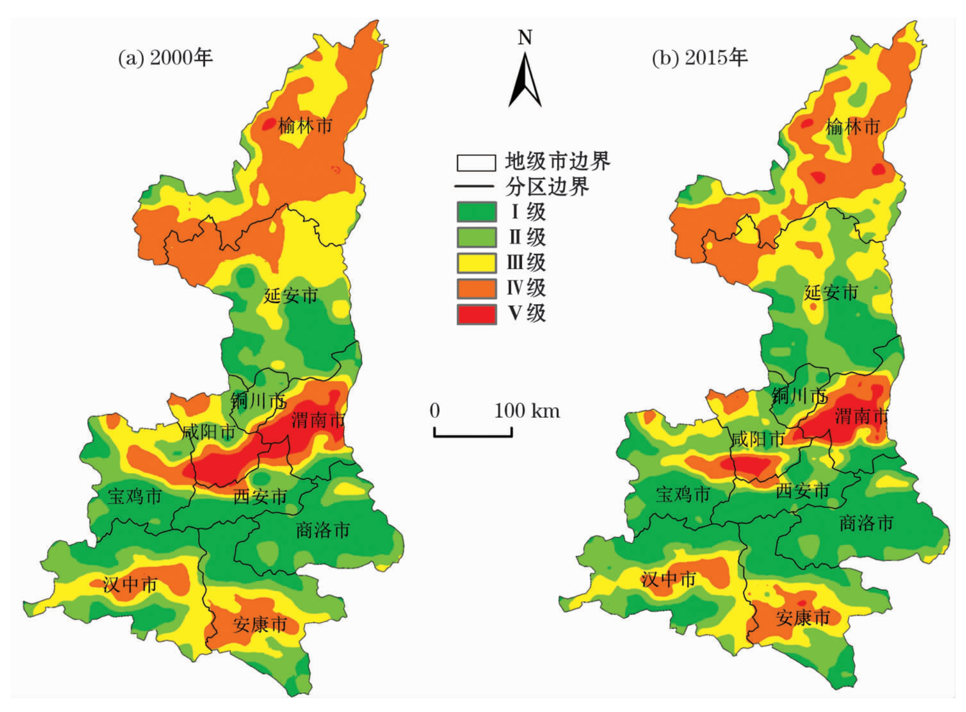


图3　2000—2015年陕西省景观功能脆弱性时空演化

Fig. 3　The spatio-temporal evolution of landscape function vulnerability in Shaanxi Province during 2000 – 2015

chinaXiv:202004.00062v1

ChinaXiv合作期刊

中盆地交界地带以及延安东南部，呈团块状分布。2015 年脆弱性基本保持 2000 年的空间格局，但各等级面积比有所变化。Ⅰ、Ⅱ 级面积比分别上升 4.42% 和 3.19%。Ⅲ 级面积变化微弱，零星分散化趋势显著。Ⅳ、Ⅴ 级面积比分别减少 4.80% 和 1.55%，且空间格局变化明显，关中盆地、榆林地区Ⅴ级高脆弱性核心缩小明显。

3.1.2 景观功能脆弱性 陕西省景观功能脆弱性空间差异同样显著，高值区集中于北部和中部、低值区零星分布的空间格局（图 3）。2000 年 Ⅴ 级脆弱区面积占比为 8.87%，集中分布于关中平原以及西北部地区；关中平原地区，城镇化水平高、建设用地占比面积大，西北部地区多为黄土丘陵沟壑区与风沙区，导致景观功能脆弱性较高。Ⅲ、Ⅳ 级在 Ⅴ 级周围呈环状分布，占比面积最大，为 60.34%。Ⅰ、Ⅱ 级占比为 30.79%，主要分布于 3 大自然单元交错地带；该区域人类活动强度较低，植被覆盖率不断提升，景观功能脆弱性低值区不断扩大，呈现北上与南下外推扩展趋势。与 2000 年相比，2015 年景观功能脆弱性整体降低 14.27%，陕北高脆弱核心区有所缩小，主要受退耕还林影响，与耕地减少、土壤污染减少、林草地增加有密切关系。

3.1.3 景观生态脆弱性时空演化 景观生态脆弱性是景观格局与功能脆弱性的集成表达。2000 年和 2015 年陕西省景观生态脆弱性指数分别为 0.428、0.370，减少 5.80%。为更好地说明脆弱性变化特征，本文采用转移矩阵分析各等级脆弱性面积转化情况（表 2）。研究期间脆弱性转移类型除各个脆弱性级别面积保持不变外，主要有 Ⅱ－Ⅰ、Ⅲ－Ⅰ、Ⅳ－Ⅰ、Ⅲ－Ⅱ、Ⅳ－Ⅱ、Ⅳ－Ⅲ、Ⅴ－Ⅲ、Ⅴ－Ⅳ 8 个

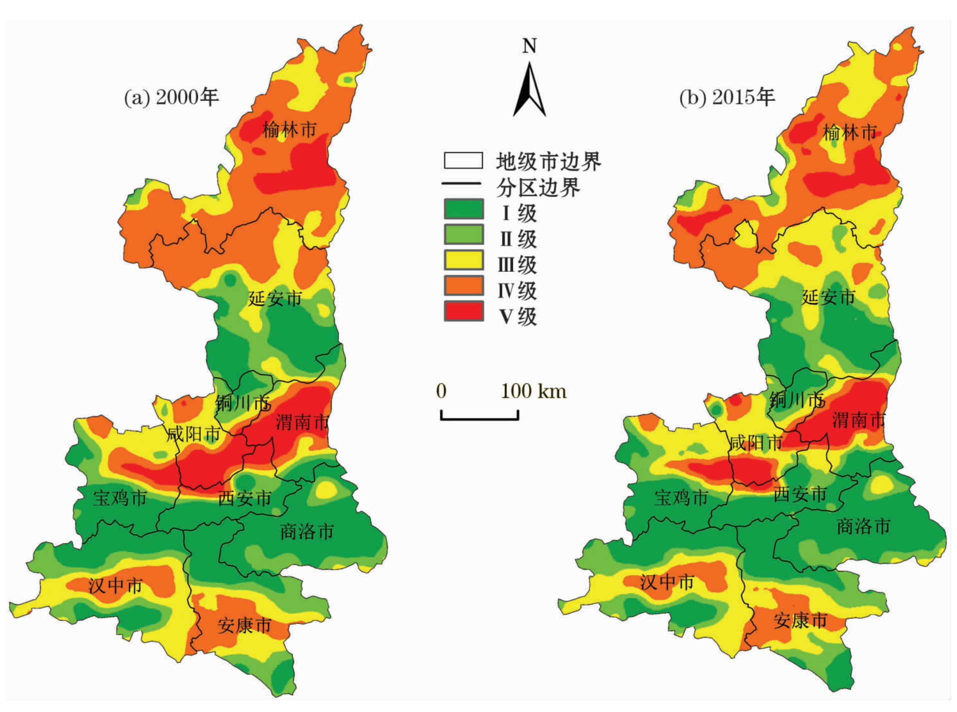


图 4 2000—2015 年陕西省景观生态脆弱性时空演化

Fig. 4 The spatio-temporal evolution of landscape ecological vulnerability in Shaanxi Province during 2000－2015

表 2 2000—2015 年景观生态脆弱性转移矩阵

Tab. 2 Transition matrixes of landscape ecological vulnerability during 2000－2015 /km²

脆弱性等级	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	2000 年总计
Ⅰ	50 774.12					50 774.12
Ⅱ	8 397.00	34 081.56	1 399.60			43 878.16
Ⅲ	387.05	13 950.02	34 760.71	2 301.08		51 398.86
Ⅳ	169.56	1 492.94	10 988.99	37 995.26		50 646.75
Ⅴ			673.58	1 821.24	6 389.19	8 884.01
2015 年总计	59 727.73	49 524.52	47 822.88	42 117.58	6 389.19	205 581.90
面积净变化	8 953.61	5 646.36	－3 575.98	－8 529.17	－2 494.82	

chinaXiv:202004.00062v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202004.00062v1

等级减少转移类型以及 II－III、III－IV 2 个等级增加转移类型。由转化流向可知，脆弱性等级均在自身等级基础上转向较低一级为主，脆弱性等级由高向低转化面积占比为 18.43%，而由低变高的面积占比为 1.80%。说明脆弱性整体呈降低趋势。

同时，研究区景观生态脆弱性空间分异显著，大致呈现出南北方向高低交错的空间布局(图 4)。2000 年 I、II 级脆弱区约占总面积的 40%，主要分布于关中与秦巴山地交界区以及陕北延安市。IV、V 级占比为 27.66%，集中于北部、中部及部分安康市、汉中市的中心地带，呈团块状分布。与 2000 年相比，2015 年脆弱性维持前期的空间格局，但各等级占比变化较大，脆弱性有明显降低。IV、V 级占比分别下降 2.98% 和 1.48%，其中 III 级面积的增加是研究期间脆弱性转移面积最大类型，外扩明显且已连接成片，达到研究区面积的 1/3，面积增加 6.51%。I、II 级面积分别增加 4.99% 和 2.25%，且空间格局变化明显，延安市低等级核心区扩大明显，相较而言榆林市高脆弱核心区缩小显著。

研究期间 3 大分区景观生态脆弱性空间演化差异显著，有明显分区过渡表现。黄土高原区脆弱性整体呈北高南低分布，2000—2015 年脆弱性指数分别为 0.531 2 和 0.445 9，降低了 8.53%。沿陕北长城线一带高等级脆弱性核心区域有所减少，IV、V 等级面积比例共减少 8.40%；关中盆地地区生态脆弱性整体呈现中部高、周边低的空间分布，2000—2015 年脆弱性指数分别为 0.384 1 和 0.346 0，降低了 3.81%，变化较小。沿关中平原川道沿线一带高等级脆弱性核心区同样显著缩减，IV、V 等级脆弱区面积分别减少 13.38%、8.10%，而 III 级减少最多；秦

表 3　2000—2015 年景观生态脆弱性等级面积比例变化

Tab. 3　The percentage and variation of the landscape ecological vulnerability in Shaanxi Province during 2000－2015

/%

区域	年份	I	II	III	IV	V
全省	2000	18.64	23.10	30.58	23.75	3.91
	2015	23.63	25.35	37.09	20.77	2.43
黄土高原	2000	11.76	14.43	31.73	41.76	0.32
	2015	12.91	21.17	37.65	33.50	0.18
关中盆地	2000	33.02	26.68	16.26	13.68	10.39
	2015	11.42	6.62	6.50	0.30	2.29
秦巴山地	2000	41.34	26.29	20.03	12.34	0.02
	2015	44.59	25.37	18.62	11.30	0.11

巴山地区域脆弱性整体呈西南高、东北低的分布格局，2000—2015 年脆弱性指数分别为 0.375 1 和 0.363 2，降低了 1.20%，变化微弱(表 3)。

4　脆弱性演化影响因素

参考其他研究成果[26－31]，结合研究区实际情况，从自然环境和社会经济 2 个维度甄选出 10 个指标来分析生态脆弱性动态变化的影响因素。首先，采用自然断点法对自变量进行分层；其次，创建 12 km×12 km 格网用于匹配因变量和自变量。将上述因子值和脆弱性值导入地理探测器模型，得出各因子对脆弱性的影响力 q 值(表 4)。

表 4　变量和指标说明

Tab. 4　Description of variables and measures

探测维度	因子	指标
	地形	坡度($X1$)
		高程($X2$)
自然环境	气候	年均降水量($X3$)
		年均气温($X4$)
	植被	植被覆盖率($X5$)
	经济水平	生产总值($X6$)
		社会固定资产投资($X7$)
社会经济	社会发展	城镇化率($X8$)
		人口密度 ($X9$)
	土地整治	垦殖率($X10$)

4.1　因子探测

从图 5 得知，各因子对陕西省景观生态脆弱性大小都有不同程度影响。由于分析尺度比较大，而均质化的区域内部差异，致使影响因素作用有相对弱化现象。综合来看，自然环境因子解释力大体保持稳定状态，而社会经济因子解释力趋于上升。近 15 a 来，自然环境因素对全省景观生态脆弱性变化起重要作用；社会经济要素对景观生态脆弱性变化影响相对较小，但大部分社会经济因子对景观生态脆弱性变化贡献率有所提升。

黄土高原区自然环境较差，水土流失严重、景观无序性显著。随着退耕还林政策的推行，区域生态脆弱性有所下降。2000—2015 年自然因素中的坡度 $X1$、高程 $X2$、年均降水量 $X3$、植被覆盖率 $X5$ 的解释力虽有下降，但对脆弱性仍保持重要影响。社会经济因子整体解释力偏低，但各因子解释力有所提升。关中盆地相较于黄土高原区脆弱性降低较

ChinaXiv合作期刊

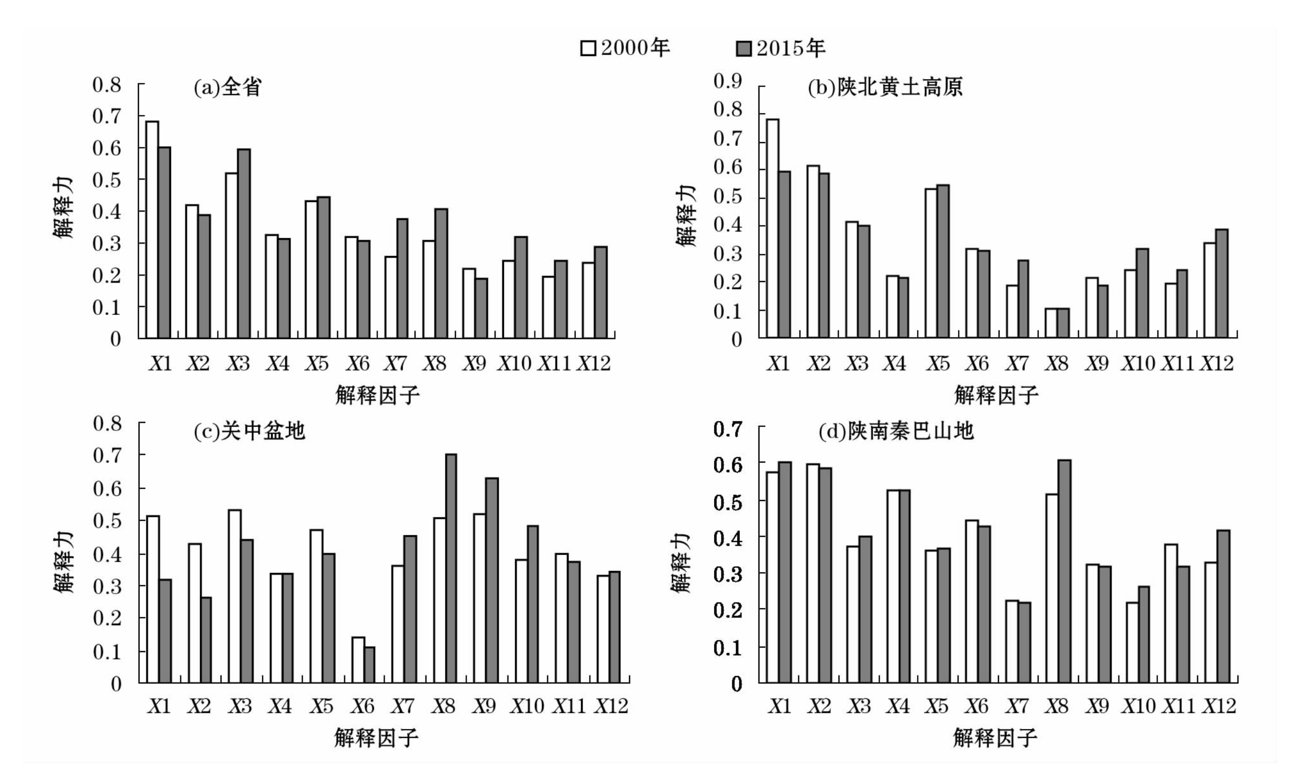


图5 2000—2015年陕西省及3大单元各因子解释力

Fig. 5 The explanatory power of each factor in Shaanxi Province and three units in 2000 and 2015

小,但内部差异有所增大。研究期间自然环境和社会经济因子都对该区脆弱性变化产生重要影响。城镇化率 X8、社会固定资产投资 X7、年均降水量 X3 是脆弱性主要解释因子。社会经济方面,生产总值 X6、人口密度 X9 解释力持续增加,说明社会经济发展对该区域脆弱性影响显著。而自然因素对脆弱性演化的影响有所减弱;秦巴山地脆弱性总体维持稳定状态,但其内部空间差异也较明显。坡度 X1、高程 X2、年均气温 X4 保持着高解释力,这说明自然环境是区域脆弱性演化的主要因素。同时,由于秦巴山区经济水平差异,且土地整治落实的不均衡,导致该地区脆弱性差异较大。

4.2 交互探测

从省域层面看,自然因子和社会经济因子间交互作用显著(表5)。各因子间交互关系以非线性增强和双因子增强为主,且非线性增强多于双因子增强。可以看出,自然因子内部交互强于自然和社会经济因子交互,自然和社会经济因子交互强于社会经济因子内部交互。显然,自然环境变量对脆弱性变化起主导作用,但自然与社会经济因子交互同样

表5 陕西省及3大单元主要交互因子及其变化

Tab. 5 The main interaction factors of Shaanxi Province and three units and their changes

年份	全省	黄土高原	关中盆地	秦巴山地
2000	X1∩X2(0.556)	X1∩X2(0.642)	X1∩X3(0.507)	X1∩X7(0.52)
	X1∩X3(0.549)	X1∩X5(0.532)	X5∩X7(0.452)	X2∩X7(0.492)
	X2∩X3(0.532)	X1∩X3(0.528)	X7∩X10(0.568)	X1∩X2(0.488)
	X1∩X5(0.465)	X2∩X5(0.445)	X8∩X10(0.485)	X2∩X3(0.485)
	X1∩X8(0.449)	X1∩X10(0.423)	X3∩X5(0.463)	X3∩X10(0.403)
2015	X1∩X3(0.602)	X1∩X2(0.556)	X7∩X8(0.565)	X1∩X8(0.547)
	X1∩X10(0.548)	X1∩X5(0.832)	X8∩X10(0.545)	X1∩X2(0.505)
	X1∩X2(0.483)	X1∩X10(0.465)	X1∩X3(0.520)	X1∩X4(0.500)
	X3∩X7(0.464)	X2∩X5(0.452)	X3∩X7(0.472)	X1∩X10(0.473)
	X3∩X9(0.452)	X1∩X9(0.425)	X8∩X10(0.370)	X4∩X7(0.453)

注:考虑篇幅因素,仅列出陕西省及3大单元部分因子交互作用值。

chinaXiv:202004.00062v1

ChinaXiv合作期刊

有明显协同增强效应。

从内部分区层面看,黄土高原和秦巴山地两分区的因子间交互关系以非线性增强作用为主,双因子增强作用为辅。而关中盆地大多是双因子增强作用。研究期间黄土高原与秦巴山地各因子间交互作用呈现与省域相同特征,表现为:自然因子和社会经济因子间交互作用明显强于自然因子(社会经济因子)内部交互,而关中盆地各因子交互表现为:社会经济因子内部交互强于自然与社会经济因子间交互作用。2000 年以来,自然因子及社会经济因子之间的交互作用不断加强,具体表现为:关中盆地最强,其次是秦巴山地,黄土高原最弱。自然环境要素对 3 大自然分区脆弱性变化发挥着重要作用。但由于陕西省独特的自然与社会经济特性,具体作用也不同。相较于整体层面,其分区层面脆弱性演化影响机制更具复杂性。

5　结论与讨论

5.1　结论

(1) 研究区景观格局脆弱性空间差异显著,大致呈现出高值区分布于北部及中部、低值区分布于中部两侧。景观功能脆弱性空间差异同样显著,高值区集中于北部和中部、低值区零星分布的空间布局。

(2) 景观生态脆弱性空间分异显著,呈现出为南北方向高低交错的分布格局。脆弱性稍有降低,降低值为 5.80%。其中,黄土高原、关中盆地和秦巴山地各分区脆弱性分别降低 8.55%、3.81% 和 1.20%,3 大分区脆弱性空间分布及演化差异显著,且有明显分区过渡表现。

(3) 在省域和分区两尺度层面上,景观生态脆弱性变化影响因素差异较大。自然环境因素对 2 个尺度景观生态脆弱性起主导作用,而社会经济要素对脆弱性影响有提升趋势。此外,在省域和分区 2 尺度各因子交互对脆弱性变化都有协同增强效应。

5.2　讨论

引入生态系统服务价值来量化景观功能脆弱性指数,整合景观格局与景观功能 2 方面来构建景观生态脆弱性模型,对脆弱性管控与生态系统恢复具有重要的理论和实际意义。景观生态系统脆弱性评估研究中应进一步整合社会自然数据,在景观格局与景观功能层面评价脆弱性基础上合理叠加生态过程中的暴露因子、风险因子等。因此,将景观生态脆弱性评估深化为社会-生态复合景观生态脆弱性研究是今后努力的方向。

对省域和 3 分区 2 个尺度的实证研究,对比分析不同尺度、不同地貌分区景观生态脆弱性时空演化,可以更好地揭示在复杂多样性社会自然环境下影响脆弱性时空变化机制,验证了尺度差异对脆弱性影响因素研究的必要性。利用地理探测器方法可以较系统地从自然环境及社会经济因素分析生态脆弱性的驱动因素,但由于影响因素庞杂多样且时间跨度大,需在后续研究中加强多元数据积累。

参考文献(References):

[1] Polsky C, Neff R, Yarnal B. Building comparable global change vulnerability assessments:The vulnerability Sco-ping Diagram[J]. Global Environmental Change,2007,17(3):472-485.

[2] 李鹤,张平宇. 全球变化背景下脆弱性研究进展与应用展望[J]. 地理科学进展,2011,30(7):920-929. [Li He, Zhang Pingyu. Research progress and prospective applications of vulnerability approach under global change[J]. Progress in Geography, 2011,30(7):920-929.]

[3] 李平星,樊杰. 基于 VSD 模型的区域生态系统脆弱性评价——以广西西江经济带为例[J]. 自然资源学报,2014,29(5):779-788. [Li Pingxing, Fan Jie. Regional ecological vulnerability assessment based on VSD model:A case study of Xijiang River economic belt in Guangxi[J]. Journal of Natural Resources,2014,29(5):779-788.]

[4] 彭建,党威雄,刘焱序,等. 景观生态风险评价研究进展与展望[J]. 地理学报,2015,70(4):664-677. [Peng Jian, Dang Weixiong, Liu Yanxu, et al. Review on landscape ecological risk assessment[J]. Acta Geographica Sinica,2015,70(4):664-677.]

[5] 任志远,张晗. 银川盆地土地利用变化对景观格局脆弱性的影响[J]. 应用生态学报,2016,27(1):243-249. [Ren Zhiyuan, Zhang Han. Effects of land use change on landscape pattern vulnerability in Yinchuan Basin[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(1):243-249.]

[6] 孙鸿超,张正祥. 吉林省松花江流域景观格局脆弱性变化及其驱动力[J]. 干旱区研究,2019,34(7):950-957. [Sun Hongchao, Zhang Zhengxiang. Changes of landscape pattern vulnerability of Songhua River Basin in Jilin Province and its driving forces[J]. Arid Zone Research,2019,34(7):950-957.]

[7] 孙才志,闫晓露,钟敬秋. 下辽河平原景观格局脆弱性及空间关联格局[J]. 生态学报,2014,34(2):247-257. [Sun Caizhi, Yan Xiaolu, Zhong Jingqiu. Evaluation of the landscape patterns vulnerability and analysis of spatial correlation patterns in the lower reaches of Liaohe River Plain[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(2):247-257.]

chinaXiv:202004.00062v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202004.00062v1

[8] 郑度,吴绍洪,尹云鹤,等. 全球变化背景下中国自然地域系统研究前沿[J]. 地理学报,2016,71(9):1475 - 1483. [Zheng Du,Wu Shaohong,Yin Yunhe,et al. Frontiers in terrestrial system research in China under global change[J]. Acta Geographica Sinica,2016,71(9):1475 - 1483.]

[9] Metzger M J,Leemans R,Schr. A multidisciplinary multi-scale framework for assessing vulnerabilities to global change[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation,2005,7(4):253 - 267.

[10] 梁二敏,张军民,杨卫红. 新疆玛纳斯河流域绿洲景观生态脆弱性时空分异[J]. 干旱区研究,2017,34(4):950 - 957. [Liang Ermin,Zhang Junmin,Yang Weihong. Spatiotemporal variation of landscape ecological vulnerability in oasis in the Manas River Basin,Xinjiang[J]. Arid Zone Research,2017,34(4):950 - 957.]

[11] 傅伯杰. 景观生态学原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2001. [Fu Bojie. Principle and Application of Landscape Ecology [M]. Beijing:Science Press,2001.]

[12] 傅伯杰,周国逸,白永飞,等. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J]. 地球科学进展,2009,24(6):571 - 576. [Fu Bojie,Zhou Guoyi,Bai Yongfei,et al. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China[J]. Advances in Earth Science,2009,24(6):571 - 576.]

[13] Ortega M,Saura S,González-Avila S,et al. Landscape vulnerability to wildfires at the forest-agriculture interface:Half-century patterns in Spain assessed through the SISPARES monitoring framework [J]. Agroforestry Systems,2012,85(3):331 - 349.

[14] 徐燕,孙小银,张大智,等. 1980—2015 年南四湖流域景观格局及其脆弱性[J]. 应用生态学报,2018,29(2):635 - 642. [Xu Yan,Sun Xiaoyin,Zhang Dazhi,et al. Landscape pattern and its vulnerability in Nansi Lake Basin during 1980 - 2015[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2018,29(2):635 - 642.]

[15] Zang Z,Zou X,Zuo P,et al. Impact of landscape patterns on ecological vulnerability and ecosystem service values:An empirical analysis of Yancheng Nature Reserve in China[J]. Ecological Indicators,2017,72:142 - 152.

[16] Sati V P. Landscape vulnerability and rehabilitation issues:A study of hydropower projects in Garhwal region,Himalaya[J]. Natural Hazards,2015,75(3):2 265 - 2 278.

[17] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报,2017,72(1):116 - 134. [Wang Jinfeng,Xu Chengdong. Geodetector:Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica,2017,72(1):116 - 134.]

[18] 孙艺杰,任志远,赵胜男,等. 陕西河谷盆地生态系统服务协同与权衡时空差异分析[J]. 地理学报,2017,72(3):521 - 532. [Sun Yijie,Ren Zhiyuan,Zhao Shengnan,et al. Spatial and temporal changing analysis of synergy and trade-off between ecosystem services in valley basins of Shaanxi Province[J]. Acta Geographica Sinica,2017,72(3):521 - 532.]

[19] 刘胜涛,牛香,王兵,等. 陕西省退耕还林工程生态效益评估[J]. 生态学报,2018,38(16):5759 - 5770. [Liu Shengtao,Niu Xiang,Wang Bing,et al. An ecological benefit assessment of the grain for green project in Shaanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(16):5759 - 5770.]

[20] 徐羽,钟业喜,冯兴华,等. 鄱阳湖流域土地利用生态风险格局[J]. 生态学报,2016,36(23):7850 - 7857. [Xu Yu,Zhong Yexi,Feng Xinghua,et al. Ecological risk pattern of Poyang Lake basin based on land use[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(23):7850 - 7857.]

[21] 田鹏,李加林,姜忆湄,等. 海湾景观生态脆弱性及其对人类活动的响应——以东海区为例[J]. 生态学报,2019,39(4):1463 - 1474. [Tian Peng,Li Jialin,Jiang Yimei,et al. Ecological vulnerability of the bay landscape and its response to human activities:A case study of the East China Sea[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(4):1463 - 1474.]

[22] 赵筱青,王兴友,谢鹏飞,等. 基于结构与功能安全性的景观生态安全时空变化——以人工园林大面积种植区西盟县为例[J]. 地理研究,2015,34(8):1581 - 1591. [Zhao Xiaoqing,Wang Xingyou,Xie Pengfei,et al. Spatio-temporal changes of landscape eco-security based on structure and function safety:A case study of a large artificial forest planted area in Ximeng County,China[J]. Geographical Research,2015,34(8):1581 - 1591.]

[23] 马胜,梁小英,刘迪,等. 生态脆弱区多尺度景观生态风险评价——以陕西省米脂县高渠乡为例[J]. 生态学杂志,2018,37(10):3171 - 3178. [Ma Sheng,Liang Xiaoying,Liu Di,et al. Multi-scale landscape ecological risk assessment in ecologically fragile regions:A case study in Gaoqu Town in Mizhi County,Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Ecology,2018,37(10):3171 - 3178.]

[24] 彭建,王仰麟,景娟,等. 城市景观功能的区域协调规划——以深圳市为例[J]. 生态学报,2005,25(7):1715 - 1719. [Peng Jian,Wang Yanglin,Jing Juan,et al. Research on integrated regional planning of urban landscape functions:A case study in Shenzhen City[J]. Acta Ecologica Sinica,2005,25(7):1715 - 1719.]

[25] 谢高地,张彩霞,张雷明,等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报,2015,30(8):1243 - 1254. [Xie Gaodi,Zhang Caixia,Zhang Leiming,et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources,2015,30(8):1243 - 1254.]

[26] 王志杰,苏嫄. 南水北调中线汉中市水源地生态脆弱性评价与特征分析[J]. 生态学报,2018,38(2):432 - 442. [Wang Zhijie,Su Yuan. Analysis of eco-environmental vulnerability characteristics of Hanzhong City,near the water source midway along the route of the south-to-north water transfer project,China[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(2):432 - 442.]

[27] 郭兵,孔维华,姜琳. 西北干旱荒漠生态区脆弱性动态监测及驱动因子定量分析[J]. 自然资源学报,2018,33(3):412 - 424. [Guo Bing,Kong Weihua,Jiang Lin. Dynamic monitoring of

ChinaXiv合作期刊

ecological vulnerability in arid desert ecological region of Northwest China and the quantitative analysis of its driving forces[J]. Journal of Natural Resources,2018,33(3):412 - 424.]

[28] Lyu X J,Xiao W,Zhao Y L,et al. Drivers of spatio-temporal ecological vulnerability in an arid,coal mining region in Western China[J]. Ecological Indicators,2019,106:105475.

[29] Beroya-Eitner,Antonette M. Ecological vulnerability indicators[J]. Ecological Indicators,2016,60:329 - 334.

[30] 杜金龙,朱记伟,解建仓,等. 近25 a关中地区土地利用及其景观格局变化[J]. 干旱区研究,2018,5(1):217 - 226.[Du Jinlong,Zhu Jiwei,Xie Jiancang,et al. Changes of land use and landscape pattern in the Guanzhong area in recent 25 years[J]. Arid Zone Research,2018,5(1):217 - 226.]

[31] 刘亚文,阿不都沙拉木·加拉力丁,阿拉努尔·艾尼娃尔,等. 1989—2016年吐鲁番高昌区绿洲时空格局变化及其驱动因素[J]. 干旱区研究,2018,35(4):945 - 953.[Liu Yawen,Abdushalam Jalaliding,Alanuer Aniwaer,et al. Spatiotemporal change of the oasis in Gaochang,Turpan and its driving factors during the period of 1989 - 2016[J]. Arid Zone Research,2018,35(4):945 - 953.]

Spatiotemporal evolution and driving factors of landscape ecological vulnerability in Shaanxi Province

ZHANG Hang[1,2], CHEN Hai[1,2], SHI Qin-qin[1,2], ZHANG Min[1,2], LIU Di[1,2]

(1. *College of Urban and Environmental Science*,*Northwest University*,*Xi'an* 710127,*Shaanxi*,*China*;
2. *Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity*,*Xi'an* 710127,*Shaanxi*,*China*)

Abstract: Using the landscape pattern and landscape function to construct a landscape ecological vulnerability model for Shaanxi Province,this work analyzes two dimensions (provincial and internal natural units) of the spatiotemporal evolution of landscape ecological vulnerability. It also explores the multi-scale driving mechanism of landscape ecological vulnerability by applying a geographical probe model. The results showed the following:(1) The landscape pattern vulnerability index of Shaanxi Province in 2000 and 2015 was 0.477 3 and 0.409 7,respectively, suggesting a decrease of 6.76%. The spatial difference in landscape pattern vulnerability shows that high values are distributed in the north,whereas low values are distributed on both sides of the central area. The landscape function vulnerability index in 2000 and 2015 was 0.492 6 and 0.417 4,respectively,suggesting a decrease of 7.52%. The spatial difference in landscape functional vulnerability is concentrated in the scattered spatial layout of low-value areas in the north and the central region. (2) In 2000 and 2015, the landscape ecological vulnerability index of Shaanxi Province was 0.427 5 and 0.369 7,respectively,suggesting a decrease of 5.78%. The spatial difference in vulnerability is significant,and the overall distribution pattern from south to north shows a high-low zonal staggered distribution pattern,with an obvious transition between internal partitions. The vulnerabilities of the Loess Plateau, Guanzhong Basin,and the Qinba Mountains were reduced by 8.55%,3.81%,and 1.20%,respectively. (3) The influencing factors of the whole province and internal divisions vary with the geographical scale. Natural environmental factors play a vital role in the change in vulnerability,while the role of socio-economic factors are continuously increasing. The landscape ecological vulnerability assessment method proposed in this paper can provide a reference for the ecological vulnerability assessment. The research conclusion can provide a decision-making basis for regional sustainable development.

Key words: landscape ecological; vulnerability; spatiotemporal change; driving force; geographical detector; Shaanxi Province

chinaXiv:202004.00062v1